

## DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA NUMÉRICA PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS CORTICALES 1D DE LA CIUDAD DE CUMANÁ, BASADA EN RELACIONES H/V, OBTENIDAS A PARTIR DE REGISTROS DE MICROTREMORES

FRANCISCO A. BONIVE A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Sismología, Núcleo de Sucre, Universidad de Oriente  
e-mail: fbonive@udo.edu.ve

Recibido: marzo 2016

Aprobado para publicación: enero 2017

### RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló una nueva metodología para la obtención de un perfil 1D de corteza somera de la ciudad de Cumaná usando curvas H/V. Esta metodología está basada en el desarrollo de un nuevo tipo de algoritmo genético llamado fenotípico (AGF), en el cual el proceso de estimación de individuos (funciones) se fundamenta, además de la estructura genética en sí, en una estimación por condiciones de similitud con la curva patrón, por ejemplo, las ubicaciones de los máximos no pueden diferenciarse más de 5 %. Con estas funciones obtenidas se determinaron espesores sedimentarios, velocidades de onda S y densidades en un modelo 1D, a partir de los registros de microtremores. El perfil somero de la ciudad de Cumaná presenta dos posibles grupos de soluciones, las cuales se diferencian solo en el espesor sedimentario. Para el primer grupo de soluciones, llamado someras, es de aproximadamente  $(80 \pm 20)$  m y para el segundo grupo, llamado profundo, es de  $(210 \pm 40)$  m. Los valores de los parámetros que completan estos grupos de soluciones son velocidad de onda S en la capa sedimentaria de  $(320 \pm 80)$  m/s, en el basamento de  $(1800 \pm 200)$  m/s, razón de densidades de 1.9 entre el sedimento y el basamento. Se definieron dos nuevas constantes, la extinción y el ruido de fondo, al hacer la aproximación en el conjunto de soluciones, con el modelo de reflexión múltiple de onda S. Se propone para futuras investigaciones, revisar si guardan relación con alguna variable geotécnica.

*Palabras clave:* algoritmo genético fenotípico, propiedades dinámicas del suelo, microtremores, método de Nakamura, sismología

## DEVELOPMENT OF A NUMERICAL METHODOLOGY FOR OBTAINING 1D CORTICAL MODELS OF CUMANÁ CITY, RELATIONSHIP-BASED H / V, OBTAINED FROM MICROTREMOR RECORD'S

### ABSTRACT

In this paper a new method for obtaining a 1D profile of shallow crust using curves H/V, based on the development of a new type of genetic algorithm called Phenotypic (GAPh) was developed. The estimation process of individuals (functions developed), in addition to the genetic structure itself is based on an estimate by conditions of similarity with the standard curve, for example, the location of the maximum cannot be differentiated more than 5%. With these sedimentary thicknesses, S wave velocities and densities in a 1D model of the city of Cumana were evaluated from microtremor records. The shallow soil profile of Cumana has two possible groups of solutions, differing only in the sedimentary thickness, for the first solution set is  $(80 \pm 20)$  m and the second is  $(210 \pm 40)$  m. The parameter values that complete these solutions are: S-wave velocity in the sediment layer  $(320 \pm 80)$  m / s, in the basement  $(1800 \pm 200)$  m / s, the ratio of densities of 1.9 between the sediment and basement. Two new constants, extinction and background noise, were defined when approaching the set of solutions, with the model of multiple reflection of wave S. For future research, it is suggested to check if there is any relation with a geotechnic variable.

*Keywords:* phenotypic genetic algorithm, dynamic soil properties, microtremor, Nakamura method, seismology

## INTRODUCCIÓN

Los terremotos representan la amenaza natural de tipo geológico más destructiva del planeta, no solo por la cantidad de víctimas que pueden producir, sino por lo inesperado y lo fácil de la catástrofe que son capaces de causar, logrando ocasionar mucho daño en instalaciones y edificaciones, afectando la vida de las personas que las habitan.

Hasta hace cuarenta años una de las interrogantes más importantes en el campo de la sismología era lo sectorizado que pueden ser los daños producidos por los terremotos, lo que se evidencia en el hecho de que edificios vecinos y de idéntica construcción tenían diferente nivel de daño ante un sismo destructivo.

Se necesitó cerca de treinta años de investigación japonesa (Aki, 1957, 1967; Kanai y Tanaka, 1961; Nogoshi y Igarashi, 1971; Kobayashi, 1980; Nakamura, 1989) y un sismo extraordinariamente destructivo en Latinoamérica (Chouteau, Krivochieva, Rodríguez, González y Jouanne, 1994), en una ciudad edificada sobre un espesor sedimentario máximo de 500 metros (Chouteau y otros, 1994) o más (Campos y otros, 1997), como fue el terremoto de México en 1985, para comprender por qué se sectorizan los daños. Este fenómeno, conocido como efecto de sitio, se ha convertido rápidamente en lo más estudiado en relación al riesgo y microzonificación sísmica. Aunque ya para el terremoto de Caracas en 1967, en Venezuela, había evidencia del efecto de sitio, manejado como la interacción suelo estructura (Seed y Alonso, 1974), fue el impacto del sismo de 1985 en Ciudad de México, de magnitud 8,1, con epicentro a 400 kilómetros de la capital mexicana, lo que suministró la evidencia más importante y útil de este efecto (Seed y Sun, 1989).

Para derivar la explicación de este fenómeno se necesita observar con cuidado el comportamiento de las ondas sísmicas en las cercanías del suelo, en un sitio determinado. El viaje de las ondas sísmicas refractadas por la corteza profunda va desde las rocas consolidadas, a decenas de kilómetros de profundidad, a la poca cohesión y consistencia de la corteza somera o suelo sedimentario. En los últimos cientos de metros de la trayectoria de una señal sísmica es donde se producen los mayores cambios en la señal (Kawase, Matsushima, Sánchez-Sesma, 2014); fundamentalmente, allí las variaciones importantes de rigidez y densidad producen una caída abrupta de la velocidad de fase en el estrato sedimentario, a costa de un aumento importante de la amplitud de las ondas (Udwadia

y Trifunac, 1973; Espinoza, 1999; Ren, Wen, Hiroaki y Toshihide, 2013).

Es así como las condiciones de la estructura cortical somera y del suelo definen al final al efecto de sitio (Paudyal, Yatabe, Bhandary y Dahal, 2012). Normalmente, el efecto puede cambiar abruptamente con la posición, haciendo que sea característico de porciones relativamente pequeñas de terrenos (Kawase y otros, 2014). En pocas palabras, dos efectos de sitios, registrados en zonas vecinas, pueden ser muy diferentes entre sí con un evento sísmico específico, mientras que diferentes eventos sísmicos tienden a producir, normalmente, el mismo efecto en un sitio dado con una definida respuesta espectral del suelo (Seed y Sun, 1997; Kyawa, Pramumijoyob, Huseinb, Fathanic y Kiyonod, 2015). El efecto de sitio parece ser un factor determinante al momento de calcular los parámetros relacionados con los diferentes tipos de vulnerabilidades sísmicas (Lermo y Chávez-García, 1994).

El efecto de sitio se puede vincular a la estructura cortical somera. Según Nakamura (1989), se puede calcular como una función de transferencia usando la técnica denominada H/V, la cual simplemente es una “razón espectral” (que puede ser obtenida de muchas maneras, algunas más populares que otras) entre los registros de microtemores o microtrepidaciones contenidas en el ruido ambiental, registrado en las componentes horizontales y vertical de un sismómetro. Numerosos científicos, tales como Chávez-García, Pedotti, Hatzfeld y Bard (1990); Chávez-García, Sanchez y Hatzfeld (1996); Bard (1998); Bour, Fouissac, Dominique y Martin (1998), han utilizado H/V y comprobado la fiabilidad y la credibilidad de esta técnica, la cual es, además, un método muy acertado para la estimación de espesor estratigráfico somero por medio de frecuencias fundamentales, que son evidenciadas en la funciones de transferencia de los sedimentos blandos (Morales, Vidal, Pena, Alguacil e Inanez, 1991; Yamanaka, Dravinski y Kagami, 1993; Panou, Eodulidis, Hatzidimitriou, Stylianidis y Papazachos, 2005).

Para el modelaje, el estrato superficial normalmente se considera compuesto de material menos consolidado que el basamento o estrato profundo, por lo cual tiene menor velocidad de ondas corpóreas, tanto P como S. Esto es porque a los sedimentos se les atribuyen valores menores en todos sus parámetros elásticos, como son los módulos de rigidez, de cizalla, de Poisson, entre otros. Esto permite suponer que las ondas incidentes S se atrapan entre las interfaces, tanto la superior aire-sólido (superficie) como en la inferior donde el sedimento contacta con el basamento, lo

que produce una resonancia por condiciones de contorno en estas dos interfaces. Esto fue teóricamente propuesto cerca de 1930 por Ishimoto y Sezawa (Aki, 1988).

Este trabajo tuvo como fin el desarrollo de una metodología numérica con el uso de algoritmos genéticos, basada en resultados de estudio de microtremores, para la obtención de un perfil de corteza somera general en la ciudad de Cumaná.

## METODOLOGÍA

Se puede modelar la interpretación original de Nakamura (1989) que supone generar H/V usando frecuencias resonantes con la utilización de la siguiente expresión para una onda S verticalmente incidente en un estrato sedimentario suave sobre un espacio seminfinito más consolidado.

$$fn=(2n+1)\beta_1/4h ; n=0,1,2,\dots, \quad (1)$$

donde  $\beta_1$  es la velocidad de la onda S en la capa y  $h$  es el espesor de la capa sedimentaria.

Sí la onda S no incide verticalmente se puede utilizar la siguiente expresión

$$fn=(2n+1)\beta_1/(4h \cos \theta) \quad (2)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia, el cual se mide desde la vertical hacia la dirección de propagación de la onda ( $0 \leq \theta < \pi/2$ ).

En 1980 Aki y Richards dedujeron una fórmula para el factor de amplificación en la superficie de una onda S que incide verticalmente desde abajo en un medio:

$$\|H/V(\omega)\| = \frac{2}{\sqrt{\cos^2(\omega h/\beta_1) + (\beta_1 \rho_1 / \beta_2 \rho_2) \sin^2(\omega h/\beta_1)}} \quad (3)$$

En esta expresión  $\omega$  es la frecuencia angular de la S resonante,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , las densidades ( $\rho$ ) y velocidades de onda S ( $\beta$ ) del sedimento (subíndice 1) y basamento (subíndice 2). Esta función se aproxima a dos para las longitudes de onda mucho mayores que el espesor del sedimento. El valor  $2\rho_2\beta_2/\rho_1\beta_1$  es el contraste de impedancia entre el basamento y la capa sedimentaria.

La data utilizada en el presente trabajo consiste en registros de treinta minutos de duración de ruido ambiental obtenidos en noventa sitios, en la ciudad de Cumaná (Figuras 1 y 2), aunque se obtuvieron solo en 59 curvas H/V confiables o que cumplen con los criterios de confiabilidad y pico claro enunciados en el proyecto Sesame (ECU, 2000 y 2004b).

Cada estación para la obtención de microtremores estaba constituida por un sismómetro broadband (banda ancha), un digitalizador de 24 bits, una computadora portátil con sus equipos conexos y un equipo GPS.

Se puede suponer que matemáticamente los microtremores son las soluciones permanentes de la ecuación de onda para ondas atrapadas en un sólido elástico bajo condiciones específicas de contorno, el cual es excitado energéticamente por radiaciones de campo lejano. Esto es sugerido en trabajos de investigadores como Nakamura (2008), Bonive (2009) y Kawase y otros (2014).



**Figura 1.** Ubicación relativa de la ciudad de Cumaná en Venezuela



**Figura 2.** Ubicación de 62 puntos de 90 con función de transferencia viable para el estudio

Las expresiones a utilizar para modelar este fenómeno suelen ser muy variables y siempre controversiales. A pesar de esta multitud de sistemas, todos se pueden resumir básicamente en dos grupos de expresiones, unas relacionadas con la reflexión múltiple de onda  $S$  y  $P$ , y otras referidas a la propagación dispersiva de ondas superficiales Rayleigh y/o Love.

Aun así, al modelar el fenómeno del efecto de sitio, el sistema de ecuaciones debe obedecer a la siguiente expresión matricial, aplicable para el modelaje de cualquier sistema físico basado en un análisis.

$$A \times X = Y \quad (4)$$

En este caso específico, la  $X$  es un vector que contiene las variables asociadas a las propiedades mecánicas del medio cortical somero, como las velocidades de ondas  $P$  y  $S$ , las densidades, tanto en el basamento o capa profunda, como en el estrato sedimentario, el espesor de este último, entre otras.  $A$  es una matriz, no necesariamente cuadrada, que contiene el conjunto de ecuaciones, no siempre lineales, que modelan tanto la propagación dispersiva de las ondas Rayleigh y Love, como la -reflexión múltiple de ondas  $S$  y  $P$ . Finalmente, la  $Y$ , otro vector que representa en este caso las curvas  $H/V$  obtenidas con el ruido ambiental. Para solucionar esto, normalmente se plantean dos alternativas, la primera sería el ya tradicional proceso de inversión y en segundo lugar los métodos numéricos directos que parecen adaptarse mejor a los tiempos de modernidad, donde el poder de cálculo de las computadoras ha crecido exponencialmente.

La inversión sería, en el caso general, la siguiente expresión:

$$A^{-1} \times Y = X$$

donde  $A^{-1}$  es la inversa de  $A$ .

Las metodologías de inversión se orientan hacia el manejo de las funciones objetivos que están representadas en la matriz  $A$ . Este proceso es recomendado principalmente para ecuaciones lineales debido a que las propiedades de linealidad facilitan todos los cálculos de inversión de estos sistemas. Para ecuaciones no lineales este proceso se realiza a través del manejo de infinitésimos, para tratar de transformar en lineales las expresiones y usar todas las ventajas que esto conlleva. Las dos desventajas más importantes de este tipo de técnica son que, en primer lugar, las ecuaciones no lineales son generalmente de un alto nivel

de complejidad, así que, cualquier operación numérica o funcional involucra cálculos, que en el mejor de los casos, retardan demasiado las operaciones numéricas de cómputo. La segunda desventaja es la tendencia que tiene, la mayoría de los procedimientos, a converger a mínimos locales y, por lo tanto, a resultados erróneos, o a divergir debido a una solución ensayo inicial muy alejada de la real.

Para la solución directa se utiliza simplemente la expresión 4 procediendo a generar tanto numérica como aleatoriamente una multitud de valores de las variables de  $X$  que satisfagan la ecuación. La ventaja inherente de este proceso es que no se le agrega ningún procedimiento matemático adicional para resolverlo, como en el caso de la inversión en la cual se tiende a agregarle procesos que siempre, en último caso, representan una expansión en serie, que le añade todos los problemas de convergencia que eso supone.

El aumento de poder computacional ha hecho que las metodologías de inversión se vayan poco a poco desechando por procedimientos numéricos basados en el poder de cómputo más que en elegancia. De hecho es generalizado que la mayoría de los sistemas de ecuaciones, que se intenta resolver en la actualidad, son fundamentalmente no lineales, lo que ha colocado las técnicas tradicionales de inversión en ruta hacia la obsolescencia, creando un espacio para un nuevo tipo de tratamiento numérico.

Entre los procesos directos que más se han desarrollado en los últimos treinta años sobresalen los algoritmos genéticos (AG), los cuales son métodos adaptativos o que pueden variar inteligentemente con las circunstancias (Vélez y Santos, 2006) y metaheurísticos o que buscan la mejor manera de optimización (Candotti, Mavaris y Velásquez, 2014); pueden utilizarse para solucionar problemas de búsqueda y perfeccionamiento de soluciones. Curiosamente, estos usan la lógica del proceso evolutivo genético de los organismos vivos. En el transcurso de las generaciones, las poblaciones se desarrollan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más aptos, postulados por Darwin (1859). Por emulación de este proceso, los AG son idóneos para ir creando soluciones para problemas del mundo real.

La entrada del AG es un conjunto de soluciones viables a algún problema, codificadas de alguna forma, y una métrica conocida como función de selección que permite evaluar cuantitativamente la idoneidad de cada candidata. Estas candidatas se suelen crear aleatoriamente y pueden ser hasta soluciones que ya se sabe que funcionan y se necesita que el AG las mejore. En un conjunto de candidatas creadas de manera aleatoria en cada generación, la mayoría no

funcionarán en absoluto, y serán excluidas. Sin embargo, por pura casualidad, unas pocas pueden estar cerca del individuo buscado que tiene características evolutivas bien definidas (aunque esta solo sea de manera débil y deficiente) hacia la solución del problema, lo cual se conseguirá en generaciones posteriores. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos obedece fundamentalmente a que se las codifique adecuadamente.

La flexibilidad de la optimización por algoritmos genéticos admite la tipificación de parámetros de modelos no lineales de sistemas, permitiendo operar problemas tanto monobjetivos como multiobjetivos. Una de las ventajas más importantes es que cualquier grupo de parámetros ingresados puede ser controlado eficientemente tratando de activar todas las posibles combinaciones de soluciones para el sistema bajo estudio. La perspectiva es que la aptitud promedio de la población de soluciones aumentará en cada generación y, por tanto, repitiendo este proceso en cientos o miles de iteraciones, pueden calcularse soluciones muy buenas del problema. Definido un espacio de parámetros, el AG opera sobre los puntos del espacio (o codificaciones de éstos) en vez de manipular la función objetivo o función a optimizar, la cual se necesita que se asimile al modelo.

Los AG son técnicas con normas de transformación estocásticas (basadas en el azar); y con estos se garantiza conseguir la solución final, tal vez no la mejor, pero sí bastante buena (todas las soluciones basadas en algoritmos genéticos, tienen la convergencia demostrada en Born, 1978), pero no pueden optimizarla más rápidamente que los algoritmos de optimización estándar (en tiempo finito). Si bien a varios les puede parecer sorprendente y no intuitivo, los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia extraordinariamente eficaz y exitosa para solucionar problemas.

En un AG, la función a optimizar (función objetivo)  $f(x)$  se suele denominar individuo. Esta función puede tomar variadas formas y constituye un candidato a ser solución, en la que  $x$  es un punto del espacio de parámetros buscados. Todo AG se basa en la ejecución de los siguientes pasos:

1. Crear aleatoriamente la población inicial ( $C$ ) de soluciones o individuos.
2. Evaluar todos los individuos ( $f, x$ ) y realizar los siguientes pasos mientras la condición de fin sea falsa (secuencia iterativa hasta el paso 4).
3. Escoger nuevos individuos de  $C$  mediante una sola o varias de las siguientes acciones:
  - a. La nueva  $C$  una selección particular de  $C$
  - b. La nueva  $C$  una recombinación particular de  $C$

- c. La nueva  $C$  una mutación particular de  $C$
4. Evaluar todos los individuos ( $f, x$ )
5. Evaluar condición de fin

En este algoritmo se pueden observar dos procesos diferentes: 1) La apreciación de los individuos, la cual consiste en obtener un indicador de comportamiento, la bondad, que califique a cada individuo basado en la función de evaluación  $f$ . 2) El uso de los operadores genéticos de selección, mutación y recombinación, los cuales poseen pautas de transformación estocásticas y efectúan las siguientes tareas: la selección elige los individuos de mayor bondad para participar en la siguiente iteración, la mutación altera características de las soluciones; la recombinación admite combinar dos soluciones (padres) y obtener otras dos que contienen características de sus progenitoras.

Una característica muy especial de las técnicas evolutivas es que la función que se evalúa no está limitada en modo alguno, es decir, no requiere ser derivable o analítica como en otros métodos de optimización, lo que la hace muy buena para el manejo de ecuaciones no lineales.

El desarrollo de los algoritmos genéticos fenotípicos fue una consecuencia de una programación automática que se estaba realizando para la escogencia de las condiciones iniciales óptimas para conseguir una buena inversión. Se intentó reproducir la técnica usada en el artículo de Arai y Tokimatsu, 2004. Cuando se programó la inversión se evidenció que era muy sensible a las condiciones iniciales y se dispuso un procedimiento para evaluar los niveles óptimos y ver si había relaciones entre ellas que apuntalaran esto y aparecieron distribuciones en los espacios de pseudoestados o espacio de existencia de los parámetros corticales muy interesantes; en otras palabras, aparecían lugares que atraían al sistema limitando sus posibles soluciones. Como las relaciones eran muy complejas se decidió utilizar la expresión desarrollada por Aki y Richard (1980) que en este trabajo es la expresión 3, la cual se modificó agregándole un decaimiento exponencial y un valor constante hacia el infinito, ya que esto se observa en todos los gráficos de las curvas  $H/V$  experimentales, la cual se llamará modificación de Bonive (2009), así que la expresión 3 queda de esta manera:

$$\left\| \frac{H}{V} \right\| = \frac{2}{\sqrt{\cos^2(\omega h / \beta_1) + \left(\frac{\beta_1 \rho_1}{\beta_2 \rho_2}\right) \sin^2(\omega h / \beta_1)}} e^{(Ext \cdot \omega)} + RF \quad (5)$$

donde  $Ext$  es la extinción y  $RF$  es el ruido de fondo, variables introducidas para ajustar.

Esta función define la familia de curvas para utilizarla como generador de individuos para poblaciones usadas en los algoritmos genéticos.

En relación a la técnica de  $H/V$ , se usaron dos programas informáticos, uno para la adquisición y otro para el procesamiento. El primero, Seislog, software que utiliza el Seisan (Ottemöller y Havskov, 1999) para la adquisición y digitalización de datos. A pesar de que registra la data en un formato bien específico, cuenta con un número importante de programas de conversión de formato, además tiene la cualidad de ser un software libre, sustentado por un grupo de investigación en la Universidad de Bergen, Noruega. El segundo es el J-Sesame, también software libre, construido dentro del proyecto internacional SESAME (ECU, 2000), desarrollado por los países que integran la comunidad económica europea entre los años 2001 y 2004, que se usó para determinar el efecto de sitio. El modelaje final de tremores se realizó a partir de un programa desarrollado en MATLAB® (MATHWORD) basado en una variación de los algoritmos genéticos, llamados Algoritmos Genéticos Fenotípicos (Bonive, 2009), realizados especialmente para el modelaje del efecto de sitio, a partir de registros de ruido ambiental en la región oriental de Venezuela.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

A pesar de que existe una evolución del JSESAME llamada GEOPSY (GEOPSY, 2005a), programa extenso y complejo que realiza una serie de análisis, entre ellos el cálculo de la curva  $H/V$  realizada por el JSESAME, se decidió proseguir con el uso del JSESAME porque los programas que permiten el empleo de los AGF están diseñados para leer las curvas a partir de los resultados de JSESAME. El uso de cualquiera de los programas no afecta los resultados, ya que los desarrolladores del GEOPSY sostienen que el tratamiento que realiza el programa sobre el cálculo de  $H/V$  es idéntico al JSESAME (GEOPSY, 2005b), en el cual se cita textualmente “The reference document for the  $H/V$  processing is the SESAME user guidelines, which is strongly recommended for further reading”.

También en el manual de usuario del procesamiento continuo sobre arreglos, (ECU, 2004a) se lee en el apartado 5.8 que el procesamiento de los registros obtenidos de ruido ambiental para obtener  $H/V$  produce los mismos resultados con J\_SESAMe y GEOPSY diferenciándose solo en las longitudes variables de múltiples ventanas que optimizan el procesamiento en GEOPSY, pero esto no menoscaba los resultados con el procesamiento con J-SESAME. Sin embargo, se ha notado que en la mayoría de trabajos realizados en  $H/V$  se omite la guía del proyecto SESAME,

en especial el uso de el Número Crítico de Ciclos (NCC), el cual es el factor determinante de las condiciones de credibilidad de los resultados (ECU, 2004b). A pesar de esto es posible que en futuros trabajos se aplique el GEOPSY para el procesamiento y consecución de las curvas  $H/V$ . En este trabajo todas las curvas  $H/V$  tienen el NCC superior a 400, siendo el mínimo necesario exigido en el proyecto SESAME de 200.

Para este trabajo se logró modificar la concepción natural de los algoritmos genéticos, los cuales siempre trabajan dentro de la estadística de poblaciones. En este caso se trabaja sobre estadísticas asociadas a razas (subgrupos de soluciones) por una colección de individuos con un fenotipo (forma o silueta asociada a la expresión de un gen) distinto, en una población dada. En esta percepción es crucial identificar las características de los sujetos que se aspira sean los sobrevivientes más capacitados, por lo cual la idea en los algoritmos utilizados radica en lo siguiente.

Los parámetros a determinar, para cada sitio de registro de ruido (Figuras 2, 3 y 4 ), como espesor del estrato, las velocidades de la onda S del basamento y estrato sedimentario y la razón de las densidades entre estos, se definieron como genes, y la colección de ellos, como el genoma (Bonive, 2009). Cada curva  $H/V$  es un individuo, y la variedad de soluciones para un mismo conjunto de genes se corresponde a una población de individuos con fenotipo definido o raza.

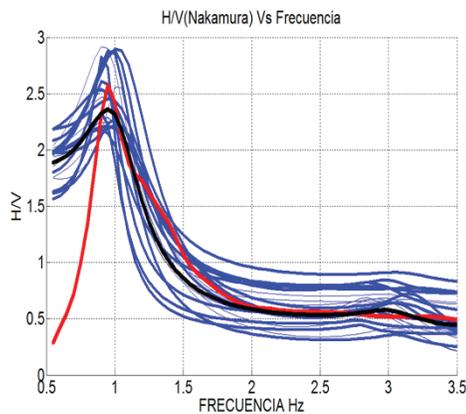


**Figura 3.** Ampliación de la zona más densa de datos para una mejor visualización de los sitios de registro

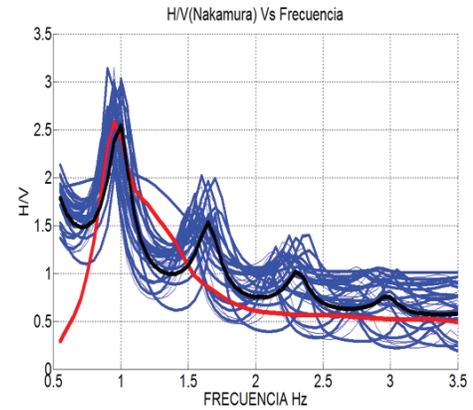
La expresión a usar como individuo en el manejo de los algoritmos genéticos fenotípicos es la 5, la cual tiene forma acampanada no simétrica con un grupo de picos que disminuyen marcadamente de baja a alta frecuencia (Figuras 5, 6, 10A y 11A). Las alturas de los picos están reguladas por la parte exponencial de la expresión y por la razón entre las velocidades de onda S y densidades entre el basamento y sedimento. Las ubicaciones de estos picos están reguladas por los argumentos de las partes senos y cosenoidales. Estos argumentos relacionan el espesor sedimentario ( $h$ ) y la velocidad de onda S en Sedimento ( $\beta_1$ ), los cuales funcionan como valores genéticos para la generación de individuos con un fenotipo específico.



**Figura 4.** Ampliación de la zona menos densa de datos para una mejor visualización de los sitios de registro

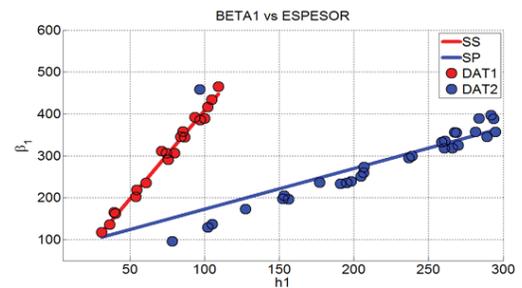


**Figura 5.** Ejemplo de solución superficial o de raza 1 en uno de los puntos de observación. El conjunto de soluciones en color azul, la solución más probable en color negro y la curva H/V calculada con el j-Sesame, en color rojo

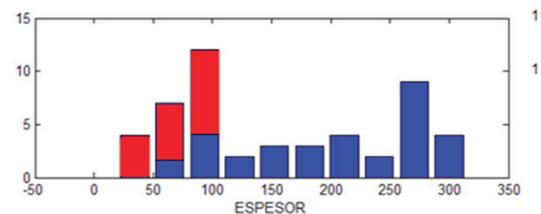


**Figura 6.** Ejemplo de solución profunda o de raza 2 en uno de los puntos de observación. El conjunto de soluciones en color azul, la solución más probable en color negro y la curva H/V calculada con el j-Sesame, en color rojo

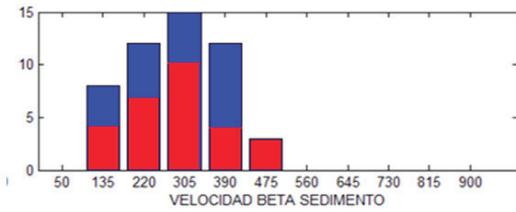
La acción fundamental en esta idea es que una combinación de genes se va a manifestar en un tipo especial de fenotipo en estas curvas; por ejemplo, hay combinaciones del gen de espesor sedimentario y de velocidad de onda S, que bajo ciertas condiciones producen individuos con un pico elevado, característico de las soluciones que se necesitan.



**Figura 7.** Grafico donde se muestra la relación entre los genes maestros para las razas 1 y 2, colores rojo y azul, respectivamente, para un punto dado de observación. La velocidad de onda S superficial ( $\beta_1$ ) en m/s y el espesor de sedimento ( $h_1$ ) en m



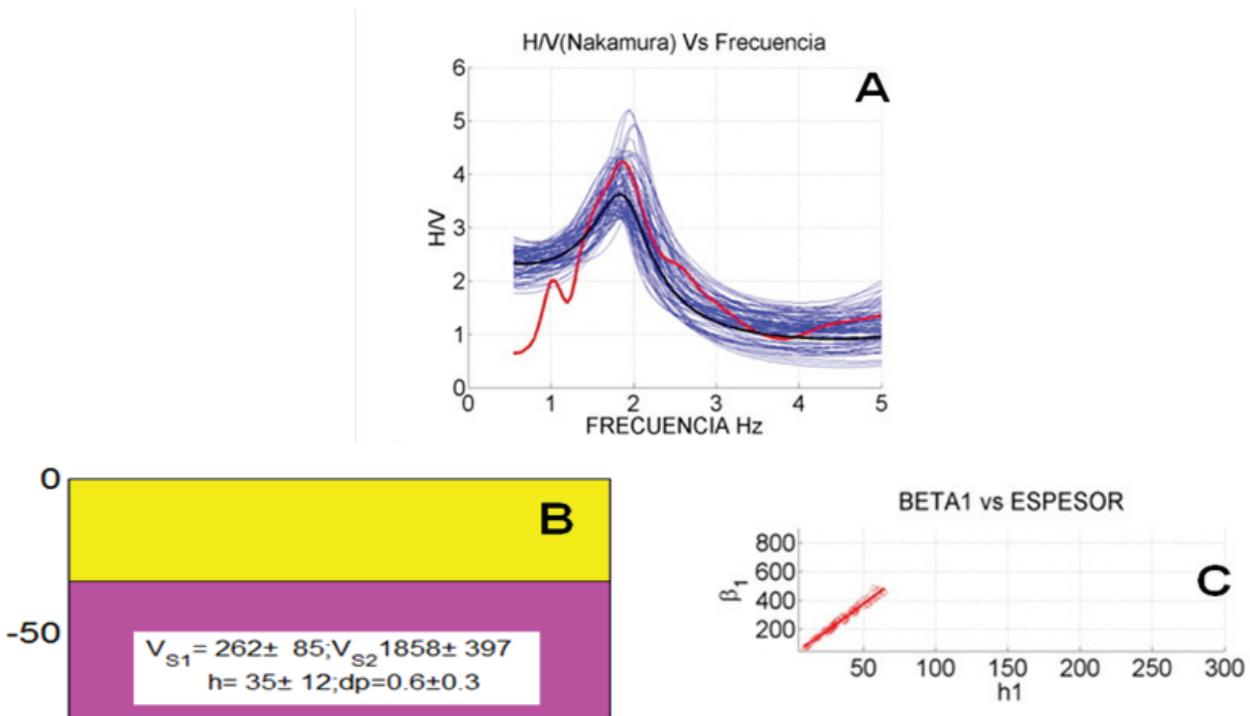
**Figura 8.** Distribución estadística del espesor sedimentario, en metros, en las dos familias de soluciones, razas 1 y 2, colores rojo y azul respectivamente



**Figura 9.** Distribución estadística de la velocidad de onda  $S$  en sedimento, en m/s, en las dos familias de soluciones, razas 1 y 2, colores rojo y azul respectivamente

Este conjunto de genes determinantes que define la forma de las curvas o individuos, se denomina en este trabajo genes maestros y producen sobre ellos mismos una distribución estadística bien específica (Bonive, 2009). Estos genes

están asociados a la forma de las curvas a través de sus máximos y mínimos. Se define también otro tipo de gen que se encarga de delimitar la forma de la curva en los regímenes asintóticos que en este trabajo se denominaron genes auxiliares, los cuales normalmente parecen tener una estadística estable en el conjunto de soluciones. Existe un tipo de gen cuyo intervalo de existencia (rango de valores que puede tomar un gen) está supeditado al intervalo de existencia de otro, a pesar de que es independiente; en este trabajo se denominan genes asociados. Los genes asociados en este trabajo serían las velocidades de onda  $S$  en el sedimento y basamento ( $\beta_1$  y  $\beta_2$ ) porque la velocidad de onda  $S$  en el sedimento es siempre menor que la velocidad de onda en el basamento por un factor dado.

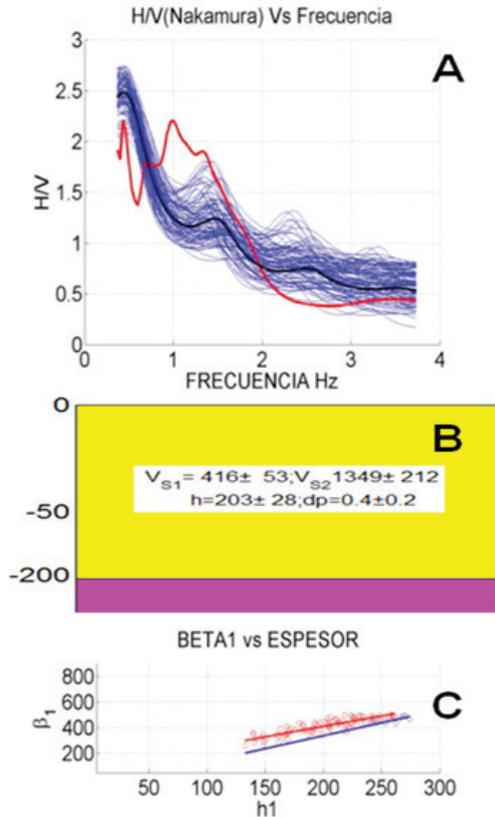


**Figura 10.** Resultados de un sitio con solo solución somera. La parte A en color azul, el conjunto de soluciones, la solución más probable en color negro y la curva  $H/V$  calculada con el  $j$ -Sesame, en color rojo. El modelo de corteza somera (B) basada en la solución más probable y, finalmente, la relación distributiva de los genes maestros velocidad de onda  $S$  superficial ( $\beta_1$ ) en m/s y el espesor de sedimento ( $h_1$ ) en m

Los otros genes, que aquí se definen como independientes, normalmente tienden a no limitarse dentro de una estadística absoluta, pero su rango de existencia se minimiza muy fuertemente, al separarse los individuos por grupos, lo que garantiza un número reducido de posibles soluciones con diferencias marcadas en sus variables (Bonive, 2009). En pocas palabras, este algoritmo genera una estadística explícita y bien determinada para los genes maestros, menos precisa para los auxiliares y marcadamente imprecisa para

los genes restantes, pero en estos últimos se disminuye efectivamente el espacio de existencia.

La condición de escogencia de los individuos que sobreviven o del más apto se aplica sobre las características fenotípicas reguladas por la combinación de los genes maestros. Los genes auxiliares normalmente alcanzan un valor determinado y su error es relativamente bajo.



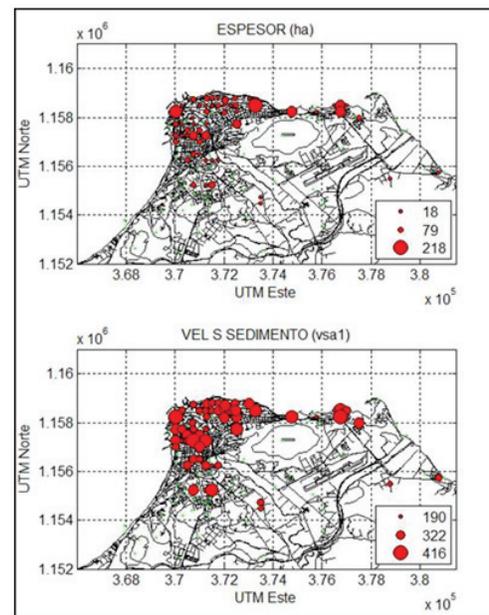
**Figura 11.** Resultados de un sitio con solo solución profunda. La parte A es el conjunto de soluciones en color azul, la solución más probable en color negro y la curva H/V calculada con el j-Sesame, en color rojo. El modelo de corteza somero (B) basada en la solución más probable y, finalmente, la relación distributiva de los genes maestros velocidad de onda S superficial ( $\beta_1$ ) en m/s y el espesor de sedimento ( $h_1$ ) en m

Los resultados numéricos para el cálculo de un punto específico escogido como ejemplo, se sintetizan en once figuras y una tabla en la que se muestran los dos tipos de razas obtenidas, la raza 1 (soluciones superficiales) y la raza 2 (soluciones profundas), en el grupo de soluciones conseguido para este punto en la ciudad de Cumaná (Figuras 5 y 6); gráfico de la relación entre dos genes maestros espesor sedimentario y velocidad de onda S en sedimento o superficial (Figura 7); el cociente estadístico entre el grupo de soluciones superficiales o de raza 1 y profunda o de raza 2, colores rojo y azul, respectivamente, para los valores de los genes maestros, espesor sedimentario y velocidad de onda S en sedimento, Figuras 8 y 9, respectivamente. Las Figuras 10 y 11 muestran las soluciones para “dos puntos geográficos distintos al usado hasta aquí de ejemplo” en los cuales se consiguen, en el primero, solo soluciones someras y en el segundo, solo soluciones profundas. En las Figuras

12 y 13 se observan las distribuciones espaciales de los genes maestros obtenidos con la reflexión múltiple de onda S, espesor sedimentario en metros ( $h$ ) y velocidad de onda S superficial o en estrato sedimentario en metros/segundos ( $vs_1$ ), para la raza 1, soluciones someras y 2, soluciones profundas. La Figura 14 es un mapa de microzonas para la ciudad de Cumaná (Arayy otros, 2015) usado para realizar una comparación con los resultados obtenidos.

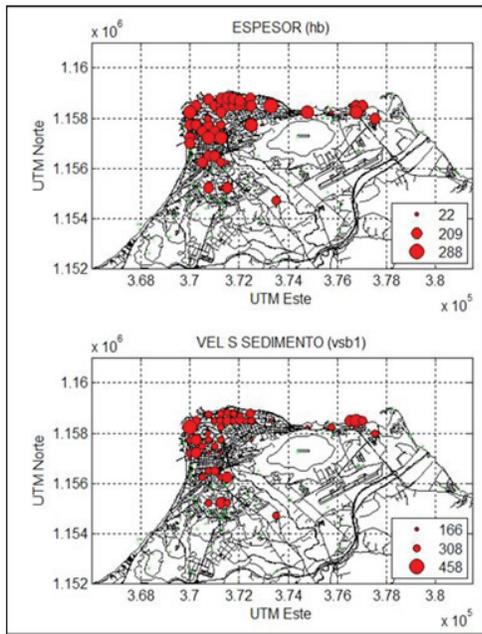
La Figura 15 muestra los modelos de corteza promedio calculados para todos los puntos, para las razas 1 y 2, A y B, respectivamente. Finalmente, la Figura 16 muestra las distribuciones de rms mínimas de las soluciones obtenidas con la reflexión múltiple de onda S, para los puntos estudiados.

Como se puede observar en la Figura 5 los genes en la raza 1 se manifiestan fenotípicamente con una curva suave, con picos muy espaciados y poco pronunciados, mientras que la raza 2 (Figura 6) se presenta con picos más prominentes y menos separados, aunque también tiene una caída suave que converge, por supuesto, de manera asintótica hasta el final de alta frecuencia. En ambas figuras se observa fácilmente el conjunto de soluciones pertenecientes a las razas 1 y 2 trazados de color azul, mientras que la solución más probable se muestra de color negro, de la curva H/V calculada con el j-Sesame, mostrada en color rojo.



**Figura 12.** Distribución espacial de los genes maestros conseguidos con la reflexión múltiple de onda S, espesor sedimentario en metros ( $h$ ) y velocidad de onda S superficial o en estrato sedimentario en metros/segundos ( $vs_1$ ), para la raza a o 1.

La Figura 7 es muy importante para entender los AGF ya que muestra la relación de los dos genes maestros que generan estas soluciones de las razas 1 y 2, que son el espesor sedimentario y la velocidad de onda S en el sedimento o velocidad de onda S Superficial. Se observa claramente que la relación es lineal y aunque comparten la distribución de velocidades, su distribución de espesores sedimentarios es muy diferente. La relación lineal es una consecuencia de la exigencia fenotípica para las soluciones posibles, que establece un pico donde la función de transferencia tiene el pico.

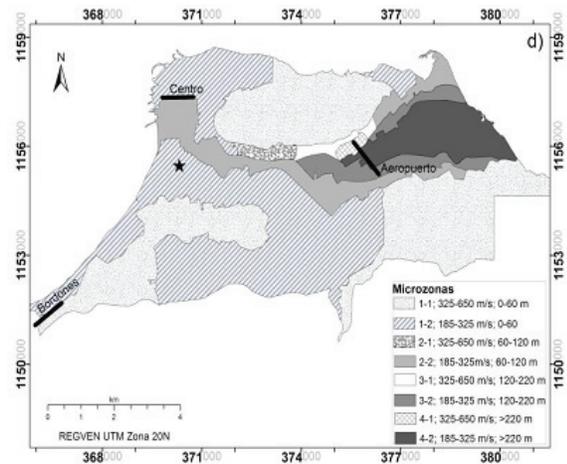


**Figura 13.** Distribución espacial de los genes maestros conseguidos con la reflexión múltiple, espesor sedimentario en metros (h) y velocidad de onda S superficial o en estrato sedimentario en metros/segundos m/s (vs1), para la raza b o 2

Las Figuras 8 y 9 muestran las proyecciones estadísticas de la gráfica de la Figura 7 sobre cada uno de los ejes que conforman este gráfico, observándose las distribuciones coincidentes de velocidad de onda S para ambas familias de soluciones o razas. En las distribuciones de espesores sedimentarios se observan diferencias ya que estas se centran en la zona de bajos espesores sedimentarios para la raza 1 y altos espesores sedimentarios para la raza 2. Este punto geográfico escogido como ejemplo presenta los dos tipos de soluciones (razas 1 y 2), pero esto no se presenta siempre, hay puntos (Figura 10) que solo tienen soluciones someras o raza 1 y otros que tienen soluciones netamente profundas o raza 2 (Figura 11).

Cuando se compara la distribución espacial de los genes maestros, para la raza 1, (Figura 12) conseguidos con la reflexión múltiple de onda S (h y vs1) y la distribución espacial de microzonas (Figura 14) calculadas en un trabajo más reciente de H/V en la zona (Aray y otros, 2015) se observa concordancia de aproximadamente un 90 % en el ámbito del rango de espesores sedimentarios, mientras que en el de velocidad de onda S, es de 70 %. La misma comparación se realizó con la distribución espacial de los genes maestros de la raza 2 (Figura 13) y la concordancia en espesor sedimentario es de aproximadamente un 30 % y en velocidad de onda S superficial es cercana al 60 %. Comparaciones más confiables escapan a los objetivos básicos del presente trabajo y se recomienda una investigación específica en la que se usen métodos numéricos más especializados para resultados más confiables.

La Figura 15 muestra los modelos de cortezas someras para el área de la ciudad de Cumaná. Los diagramas A y B son el perfil producido por la reflexión múltiple de onda S, para las dos razas de soluciones, 1 y 2. Se puede observar que todos los valores de genes son parecidos excepto el de espesor de sedimento que es diferente, 78 y 208 m. Esto permite sugerir con mucha confianza que es un solo tipo de soluciones expresadas en dos razas diferentes.



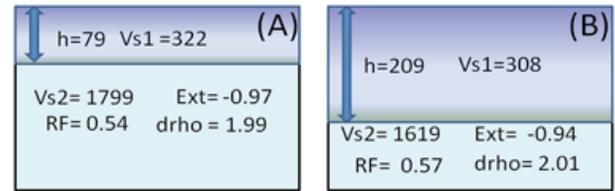
**Figura 14.** Mapa de microzonas para la ciudad de Cumaná (Aray y otros, 2015)

En 2011 (Bonive, Beuperthuy, Montilla y Rojas) publicaron un trabajo en el que se usó esta técnica para obtener resultados de parámetros corticales someros de dos localidades distintas, la población de Cumanacoa y la ciudad de Cumaná. Para este estudio se utilizaron registros de ruido ambiental de tres componentes de 30 minutos de

duración y una tasa de muestreo de 100 Hz, usándose 24 y 59 registros para la población de Cumanacoa y la ciudad de Cumaná, respectivamente.

Las conclusiones de este trabajo de Bonive señalan, en primer lugar, la proporción entre el grupo de soluciones superficiales (raza 1) y profundas (raza 2) es disímil en ambas localidades; se nota visiblemente que el número de las soluciones superficiales en la población de Cumanacoa es sobradamente superior a las soluciones profundas: 95 % a 35 % en Cumanacoa, y 86 % a 82 % en Cumaná, respectivamente. Esto significa que es más posible, en proporción de 3 a 1, obtener soluciones superficiales en Cumanacoa que en Cumaná, lo que señala concluyentemente el poco espesor esperado y calculado para las estructuras corticales del suelo en Cumanacoa. En segundo lugar, los valores promedios de los espesores (Tablas 2 y 3), tanto en los regímenes someros como profundos, son también menores en la población de Cumanacoa.

Para mejorar la discusión sobre la validez del gráfico en la Figura 16, se tomó en cuenta que lo contradictorio de la comparación de los valores de rms con curvas es que lo que tiene son regímenes asintóticos, ya que pequeñas variaciones en ellos generan grandes valores de rms; así que, la comparación rms se pudo calcular evadiendo selectivamente estas partes de las curvas. La precisión del rms se puede evaluar considerando que el valor mínimo teórico (expresión 5) de la máxima amplitud de la curva es de dos, así que un rms de 0.5 equivale a una dispersión aproximada de un 30 % y la mayoría de los rms son menores. En el trabajo de Bonive (2009) se descubrió que a partir de un valor determinado de rms para cada solución pueden coexistir varias razas y los parámetros se transfieren entre cada grupo de soluciones, lo que favorece la creación de los individuos con rms menor, ayudando la convergencia de las soluciones más probables. Por ejemplo, si se tienen dos soluciones, una de espesor de 128 m y otra de 60 m, cuando intercambian este gen las soluciones se cambian y la de 60 m tiene un rms menor que su padre de 128, así este hijo mejora la convergencia de esta línea; en otras palabras, la convergencia de la raza 2 puede terminar en una de raza 1, y viceversa. La existencia de transición en el rms de transferencia no es un factor concluyente para la separación de las razas, es más importante para la confiabilidad práctica de las dos, ya que está asociado a una distribución racional de los valores de los genes. A este rms se le llamó de transferencia (Bonive, 2009), porque a partir de él se transfieren y se fijan algunos valores de los parámetros de una raza a la otra.



**Figura 15.** Modelo con los valores medios usando todos los sitios con las razas 1 (A) y 2 (B) para todos los puntos calculados en la ciudad de Cumaná

La similitud de los AG normales y los fenotípicos (AGF) se centra principalmente en el procedimiento general de resolución y se puede extender a ciertos parámetros utilizados que garantizan definición exacta del procedimiento como algoritmo genético. Algo que se define al inicio de un AG es la codificación de los genes, la cual normalmente es binaria. En algunos casos se plantea el uso de elementos enteros o reales. Como se aprecia en la discusión de este trabajo, la codificación escogida es la real con un rango de validez positivo entre las medidas mínimas y máximas que efectivamente pueden tener estos en la naturaleza. Los parámetros usados como genes serían, entonces, espesor sedimentario, velocidades de onda S en el sedimento y basamento, la razón entre las densidades del sedimento y basamento, la extinción y el ruido de fondo.

La similitud también pasa por la generación de la población inicial de individuos, la cual se hace de manera aleatoria para cada uno de los genes usando una creación con semilla en la combinación de la fecha y hora al segundo. La parte del proceso de selección que es similar se produce usando los mejores individuos al compararlo con el patrón y usando el RMS en la sección no asintótica de la curva; partiendo de 500 individuos se escogen 250 para producir la siguiente generación. Esta se crea con apareamientos aleatorios, exclusivos y por promedios de los genes. Este procedimiento permite generar una población de 125 individuos con las mejores capacidades de adaptación. Para complementar los 500 individuos de esta generación se crean, en primer lugar, 125 individuos más por cruce de genes secundarios e independientes; en segundo lugar, 125 individuos más con un procedimiento que ha sido llamado complemento hacia el máximo, el cual consiste en restar del máximo de cada gen el valor obtenido en la población óptima. Como ejemplo se toma el valor del gen de espesor sedimentario que tiene un máximo de 600 m.; si el valor obtenido por un individuo óptimo es de 150 m, se resta de 600 y el nuevo individuo comenzará con un valor de 450m. Finalmente, los últimos 125 individuos se fabrican de forma aleatoria como la generación inicial. Para las soluciones finales, se mantienen los 50 mejor adaptados de

cada generación y se promedian los 500 mejores individuos de 100 iteraciones que sería el 10 % de 5000 soluciones obtenidas. La necesidad de mutaciones se consideró subsanada con los últimos 125 individuos aleatorios.

La diferencia entre los AG y AGF está relacionada con la forma en que se utilizan los genes codificados. En los AG todos los genes tienen la misma relevancia y se manifiestan en cada tramo de la solución en conjunto con una estadística común, asociada a cada uno de estos genes de forma bien definida; mientras que en los AGF los genes vienen por tipos y cada uno tiene distinta relevancia en el ajuste de los individuos, adecuándose a estadísticas propias e individualmente determinadas. Esto se manifiesta en la condición de las funciones de control o de aptitud, según el caso, ya que la forma fenotípica de las curvas de solución se vincula directamente. En el caso estudiado en este trabajo, se vincula a la razón de dos genes, espesor sedimentario y velocidad de onda S en sedimento, la cual incide directamente en la posición del pico principal o predominante.



**Figura 16.** Distribución de los rms entre el conjunto de soluciones más probable y las funciones de transferencia calculada por el JSESAME para todos los puntos calculados

## CONCLUSIONES

El procedimiento de los algoritmos genéticos fenotípicos (AGF) resultó ser un proceso válido y apropiado para usar numéricamente las curvas de seudorespuesta (H/V), con el modelo de reflexión múltiple de onda S, en la determinación de los valores geotécnicos para perfiles 1D corticales someros o poco profundos, de espesor sedimentario (h), velocidad de onda S, densidades, tanto en el sedimento

como en el basamento, con mucha precisión (valor de errores menor al 30 %) y geológicamente aceptables.

Las concepciones relacionadas con los AGF lograron tener congruencia, significado y utilidad dentro de la resolución de sistemas sobredeterminados de ecuaciones no lineales, como en este caso, la reflexión múltiple de onda S.

El uso de los genes maestros y de sus rms de transferencias son las piezas claves para determinar las razas, que permiten diferenciar distribuciones definidas entre los valores de los parámetros a determinar en estos sistemas de ecuaciones.

El perfil somero de Cumaná presenta dos posibles soluciones medias, diferenciándose solo en el espesor sedimentario. Para la primera solución es de (80±20) m y para la segunda es de (210±40) m. Los valores de los parámetros que completan estas soluciones son: velocidad de onda S en la capa sedimentaria de (320±80) m/s, en el basamento de (1800±200) m/s, densidades de 1.38±0.08 gr/cm<sup>3</sup> en el sedimento y 2.2±0.2 en el basamento.

Las comparaciones de estos resultados obtenidos en la ciudad de Cumaná con los conseguidos en Cumanacoa verifican estadísticamente la técnica, ya que las soluciones someras son más probables en Cumanacoa que en Cumaná, que es consistente con la geología esperada en ambas localidades (Bonive y otros, 2011).

En el trabajo de Aray y otros (2015) las microzonas encuadran en un 80 % con la raza 1 y en un 40 % con la raza 2 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores promedios más probables para cada raza de soluciones con error calculado sobre la estadística de la raza

RAZA	1 (a)	2 (b)
GEN		
Espesor sedimentario (h) m	(80±20)	(200±40)
Velocidad S en sedimento en m/s (Vs1)	(320±80)	(300±60)
Velocidad S en basamento en m/s (Vs2)	(1800±200)	(1600±200)
Extinción (Ext)	-1.0±0.3	-0.9±0.2
Ruido de Fondo (RF)	0.5±0.1	0.6±0.1
Razón de densidades (drho)	2.0±0.2	2.0±0.2

Las comparaciones básicas de los resultados obtenidos con las microzonas conseguidas en este trabajo (Aray y otros, 2015) es, para las soluciones someras o de raza 1, la concordancia con los valores de espesor sedimentario es de aproximadamente un 90 %, mientras que con los de velocidades de onda S es de 70%. Para las soluciones profundas o de raza 2 la concordancia en espesor sedimentario es de aproximadamente un 30 % y en velocidad de onda S superficial es cercana al 60 %.

Se definieron dos nuevas constantes, la extinción y el ruido de fondo, al hacer la aproximación en el conjunto de soluciones, con el modelo de reflexión múltiple de onda S y se propone, para futuras investigaciones, revisar si guardan relación con alguna variable geotécnica.

**Tabla 2.** Propiedades de las estructuras estratigráficas promedio calculadas para la población de **Cumanacoa (Bonive et al., 2011)**; porcentaje de  $N/N_{total}$ , espesor en sedimento  $h$  (m), velocidad S en sedimento  $\beta_1$  (m/s), velocidad S en basamento  $\beta_2$  (m/s), velocidad S en basamento  $\beta_2$  (m/s), extinción  $ext1$  (adimensional) relación de densidades  $dp$  (adimensional), ruido de fondo  $RF()$ .

Régimen	Somero (raza 1)	Profundo (raza 2)
%N/Ntotal	95%	35%
$h$ (m)	50 ± 10	170 ± 40
$\beta_1$ (m/s)	320 ± 80	310 ± 60
$\beta_2$ (m/s)	1800 ± 300	1700 ± 300
$ext1$ ()	-60 ± 20	-90 ± 30
$dp$ ()	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2
$RF()$	0.9 ± 0.3	1.1 ± 0.2

**Tabla 3.** Propiedades de las estructuras estratigráficas promedio calculadas para la población de **Cumaná (Bonive et al., 2011)**; porcentaje de  $NN/N_{total}$ , espesor en sedimento  $h$  (m), velocidad S en sedimento  $\beta_1$  (m/s), velocidad S en basamento  $\beta_2$  (m/s), velocidad S en basamento  $\beta_2$  (m/s), extinción  $ext1$  (adimensional) relación de densidades  $dp$  (adimensional), ruido de fondo  $RF()$ .

Régimen	Somero (raza 1)	Profundo (raza 2)
%N/Ntotal	89%	86%
$h$ (m)	80 ± 20	200 ± 30
$\beta_1$ (m/s)	320 ± 80	340 ± 50
$\beta_2$ (m/s)	1800 ± 300	1700 ± 200
$ext1$ ()	-100 ± 30	-90 ± 20
$dp$ ()	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2
$RF()$	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.1

## AGRADECIMIENTOS

Al personal del Centro de Sismología de la Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela, por su apoyo invaluable durante las sesiones de trabajo, principalmente a los profesores Luis Daniel Beaupertuy y Jaime Avendaño, quienes contribuyeron en la interpretación, y al TSU Claudio Marchan, que contribuyó en el manejo espacial de los resultados.

## REFERENCIAS

- AKI, K. (1957). Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves with Special Reference to Microtremors, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 35, 415-457.
- AKI, K. (1967). Scaling Law of Seismic Spectrum, *J. Geophys. Res.* 72; 1217-1231.
- AKI, K. (1988). Local Site Effects on Strong Ground Motion. Proceedings of Earthquake Engineering & Soil Dynamics ii, GT Div/ASCE, Park City, Utah, June 27-30.
- AKI, K., RICHARDS P.G. (1980). *Quantitative Seismology*. New York: Freeman and Co.
- ARAI H. Y TOKIMATSU K. (2004). S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53–63.
- ARAY, J.; ROCABADO, V.; SÁNCHEZ, J.; MORALES, C.; SCHMITZ, M.; ALVAREZ, F. (2015). Resultados de estudios geofísicos como aporte al proyecto de microzonificación sísmica de Cumaná. X Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Convesis 2015, Cumaná, 28 al 30 de octubre de 2015
- BARD, P.Y. (1998): Microtremor Measurements: a Tool for Site Effect Estimation. Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion-ESG98. Yokohama, Japan, December.
- BONIVE, F. (2009). *Desarrollo de Metodología de Inversión para la obtención de modelos corticales 1D de la ciudad de Cumaná, basadas en relaciones H/V, obtenidos a partir de registro de microtremores*. (Trabajo de Grado). Universidad de Oriente, Cumaná-Venezuela

- BONIVE F., BEAUPERTHUY L., MONTILLA A., ROJAS J. (2011). Comparación cortical basada en las propiedades dinámicas medias de las ciudades de Cumaná Y Cumanacoa, estado Sucre, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 26(2), 5–6.
- BORN, J. (1978). Evolutionsstrategien zur numerischen Lösung von Adaptation- soufgaben. A dissertation. Humboldt-Universität, Berlin
- BOUR M., FOUISSAC D., DOMINIQUE P., MARTIN C. (1998). On the Use of Microtremor Recordings in Seismic Microzonation. *Soil Dyn Earthq Eng*, 17, 465–474
- CAMPOS E. J. O., DELGADO R. O. , CHÁVEZ S. R., GÓMEZ C. P., FLORES M. E. L., BIRCH F. S. (1997). The Subsurface Structure of the Chalco Sub-basin (Mexico City) Inferred from Geophysical Data. *Geophysics*, 62, 23–35
- CANDOTTI K., MAVARES D., VELÁSQUEZ R. (2014). Comparación de métodos metaheurísticos de optimización: recocido simulado. Algoritmos genéticos y búsqueda del cuco. 18(71)
- CHÁVEZ-GARCÍA F., PEDOTTI G., HATZFELD D., BARD P.Y. (1990). An Experimental Study of Site Effects near Thessaloniki (Northern Greece). *Bull Seismol Soc Am*, 80, 784–806
- CHÁVEZ-GARCÍA F., SANCHEZ L., HATZFELD D. (1996). Topographic Site Effects and HVNR a Comparison between Observation and Theory. *Bull Seismol Soc Am*, 86, 1559–1573
- CHOUTEAU M., KRIVOCHEVA S., RODRÍGUEZ CASTILLO R., GONZÁLEZ MORAN T., JOUANNE V. (1994). Study of the Santa Catarina Aquifer System (Mexico Basin) Using Magnetotelluric Soundings. *Journal of Applied Geophysics*, 31, 85 - 106.
- DARWIN C. (1859). *The Origin of Species by Means of Natural Selection*. First edition. London: Murray. Reeditado por E. Mayr, Harvard University Press. Cambridge Massachusetts (1964)
- ECU. 2000. *SESAME Project*. European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME
- ECU. (2004a). European Commission–Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME. *User Manual for Software Package CAP*
- A Continuous Array Processing toolkit for ambient vibration Array analysis WP06 Deliverable*
- ECU. (2004b). European Commission–Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME. *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation Sesame European Research Project*. WP12 – Deliverable D23.12
- ESPINOZA, F. (1999). Determinación de características dinámicas de estructuras. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña
- GEOPSY PROYECT(A). (2005). *Proyecto GEOPSY*. Recuperado de <http://www.geopsy.org/>
- GEOPSY PROYEC(B). (2005). *Manual del módulo de H/V*. Recuperado de [http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V\\_spectral\\_ratio](http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio)
- KANAI, K. y TANAKA T. (1961). On microtremors. VIII, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.* 39, 97-114.
- KAWASE H., NAGASHIMA, S., MATSUSHIMA, F. y SANCHEZ-SESMA. (2014). Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral Ratios for both Microtremors and Earthquake Motions Based on the Diffuse Field Theory. Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering, July 21-25, 2014 Anchorage, Alaska.
- KOBAYASHI, K. (1980). A method for presuming deep ground soil structures by means of longer period microtremors. Proc. 7th World Conf. Earthquake Eng., Sep. 8-13, Istanbul, Turkey, 1; pp. 237- 240.
- KYAWA Z.L., PRAMUMIJOYOB S., HUSEINB S., FATHANIC T.F., KIYONOD J. (2015). Seismic Behaviors Estimation of the Shallow and Deep Soil Layers Using Microtremor Recording and EGF Technique in Yogyakarta City, Central Java Island. *Procedia Earth and Planetary Science*, 12, pp. 31–46
- LERMO J., CHÁVEZ-GARCÍA F. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1350–1364
- MORALES J., VIDAL F., PENA A., ALGUACIL G., INANEZ J. (1991). Microtremor Study in the Sediment-Filled Basin of Zafarraya, Granada (Southern Spain). *Bull Seismol Soc Am*, 81(2), 687–693

- NAKAMURA, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface, *QR of RTRI* 30(1), 25-33.
- NAKAMURA Y. (2008). On the h/v spectrum. The 14 World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China
- NOGOSHI, M. y LGARASHI T. (1971). On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2), *Jour. Seism. Soc. Japan*, 24, 26-40. (in Japanese with English abstract)
- OTTEMÖLLER L., HAVSKOV J. (1999). Seisnet: a General Purpose Virtual Seismic Network. *Seism. Res. Lett.* 70, 522-528.
- PANOY, A.A., EODULIDIS, N., HATZIDIMITRIOU, P., STYLIANIDIS, K., PAPAACHOS, C.B. (2005). Ambient Noise Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio for Assessing Site Effects Estimation and Correlation with Seismic Damage Distribution in Urban Environment: the Case of City of Essaloniki (Northern Greece). *Soil. Dyn. Earth. Eng.*, 25(4), 261-274.
- PAUDYAL Y., YATABE R., BHANDARY N., DAHAL R. (2012). A Study of Local Amplification Effect of Soil Layers on Ground Motion in the Kathmandu Valley Using Microtremor Analysis. *Earthq Eng Eng Vib*, 11, 257-268.
- REN Y.F., WEN R.Z., HIROAKI Y., TOSHIHIDE K. (2013). Site Effects by Generalized Inversion Technique Using Strong Motion Recordings of the 2008 Wenchuan Earthquake. *Earthq Eng Eng Vib*, 12, 65-184
- SEED, H. B. y ALONSO, G. (1974). Effects of Soil Structure Interaction in the Caracas Earthquake of 1967. Proceedings, First Venezuelan Conference on Seismology and Earthquake Engineering, October.
- SEED, H. B., SUN, J. I. (1989). Implications of Site Effects in the Mexico City Earthquake of Sept. 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-89/03
- UDWADIA, F., TRIFUNAC. M. (1973). Comparison of Earthquake and Microtremor Ground Motions in El Centro, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1227-1253.
- VÉLEZ L., SANTOS C. (2006). Aproximando a los Sistemas Recomendadores desde los Algoritmos Genéticos. *Revista Colombiana de Computación-RCC*, 7(2)
- YAMANAKA, H., M. DRAVINSKI y H. KAGAMI. (1993). Continuous Measurements of Microtremors on Sediments and Basement in Los Angeles, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1595-1609.

